

不同培肥措施对采煤塌陷区复垦土壤氮素矿化的影响

李彦¹, 李廷亮^{1,2}, 焦欢¹, 高继伟¹, 何冰¹, 李顺¹

(1. 山西农业大学资源与环境学院, 山西 太谷 030801;

2. 山西农业大学农业资源与环境国家级实验教学示范中心, 山西 太谷 030801)

摘要: 为揭示不同培肥措施对采煤塌陷区复垦土壤氮素矿化特征, 采用间歇淋洗好气培养法, 研究了不施肥(CK)、单施化肥(CF)、单施有机肥(M)、化肥配施有机肥(MCF)和化肥配施生物有机肥(MCFB)5种培肥措施对复垦4年和8年土壤矿质态氮和可溶性有机氮变化及氮素矿化特征的影响。结果表明: 间歇淋洗好气培养过程中, 复垦8年土壤累积 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 产生量较4年增加2.63%~26.83%, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 累积产生量增加12.50%~32.14%, 可溶性有机氮(SON)累积产生量在CF和M处理下减少31.59%~62.50%, 其他处理增加3.44%~34.69%。同一复垦年限下 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和SON累积产生量均以MCFB最高。从矿化参数来看, 5种培肥措施土壤矿化势(N_0)均表现为复垦8年高于复垦4年土壤, 增加幅度为MCFB(26.9%)>CK(15.9%)>CF(15.0%)>M(12.7%)>MCF(4.8%); CK和CF处理下潜在可矿化有机氮(N_0/N)随复垦年限增加而减少, 减少率分别为9.4%和13.8%, 其余3种培肥措施 N_0/N 呈增加趋势, 增加率表现为MCF(13.2%)>MCFB(7.5%)>M(2.8%); MCF处理下矿化率(N_t/N)随复垦年限增加而增加, 增加率为13.2%, 其余4种培肥措施的矿化率(N_t/N)均表现为复垦8年低于复垦4年土壤, 减少幅度为CF(12.1%)>CK(9.4%)>MCFB(7.5%)>M(2.7%)。不同处理间 N_0 、 N_0/N 和 N_t/N 值则均以8年复垦土壤的MCFB处理最高。综合来看, 经过连续8年复垦, 化肥配施生物有机肥较其他培肥措施更大程度上提高了各项矿化参数值, 但随着复垦年限的增加, 以化肥配施有机肥处理的 N_0 、 N_0/N 的增加幅度最大, 以化肥配施生物有机肥处理的 N_t/N 减少率最低, 长期单施化肥有降低潜在可矿化有机氮量(N_0/N)的趋势。

关键词: 矿质态氮; 可溶性有机氮; 氮素累积量; 矿化率; 矿化势

中图分类号: S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)04-0227-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.04.036

Effects of Different Fertilization Measures on Nitrogen Mineralization in Reclaimed Soil of Coal Mining Subsidence Area

LI Yan¹, LI Tingliang^{1,2}, JIAO Huan¹, GAO Jiwei¹, HE Bing¹, LI Shun¹

(1. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University,

Taigu, Shanxi 030801; 2. National Experimental Teaching Demonstration Center for

Agricultural Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801)

Abstract: In order to reveal the characteristics of nitrogen mineralization in reclaimed soil of coal mining subsidence area with different fertilization measures, this experiment used the method of intermittent leaching and aerobic culture to study the effects of five kinds of fertilization measures, such as no fertilizer application (CK), single application of chemical fertilizer (CF), single application of organic fertilizer (M), chemical fertilizer combined with organic fertilizer (MCF), and chemical fertilizer combined with biological organic fertilizer (MCFB) on the changes of mineral nitrogen and soluble organic nitrogen in reclamation soil for 4 years and 8 years, and the characteristics of nitrogen mineralization were also studied. The result showed that: As the years of reclamation increases, the accumulated $\text{NO}_3^- - \text{N}$ production in 8 years of reclamation is 2.63%~26.83% higher than that of 4 years, the cumulative production of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ increases 12.50%~32.14%, the accumulative production of soluble organic nitrogen (SON) reduced by 31.59%~62.50% under CF and M treatments, and the other treatments increased 3.44%~34.69%. Under the same

收稿日期: 2018-03-13

资助项目: 国家自然科学基金项目(41401342)

第一作者: 李彦(1992—), 女, 山西忻州人, 在读硕士研究生, 主要从事矿区复垦与生态重建研究。E-mail: jiaotashidi0902@163.com

通信作者: 李廷亮(1982—), 男, 山西大同人, 硕士生导师, 主要从事矿区复垦与生态重建研究。E-mail: litingliang021@126.com

reclamation years, the accumulative production of $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, and SON were the highest in MCFB. According to the mineralization parameters, the mineralization potential of the five fertilization measures was higher in 8 years than that in 4 years, and the increase range were $\text{MCFB}(26.9\%) > \text{CK}(15.9\%) > \text{CF}(15.0\%) > \text{M}(12.7\%) > \text{MCF}(4.8\%)$; Under CK and CF treatments, the potential mineralizable organic nitrogen (N_0/N) decreased with the increase of reclamation years, with the decrease rates being 9.4% and 13.8%, while the other three fertilization measures (N_0/N) showed an increasing trend, with the increase rate of $\text{MCF}(13.2\%) > \text{MCFB}(7.5\%) > \text{M}(2.8\%)$. Under MCF treatment, the mineralization rate (N_t/N) increased with the increase of reclamation years, and the increase rate was 13.2%, the mineralization rate of the other four fertilization measures was lower in 8 years than that in 4 years, and decreased by $\text{CF}(12.1\%) > \text{CK}(9.4\%) > \text{MCFB}(7.5\%) > \text{M}(2.7\%)$. The values of N_0 , N_0/N , and N_t/N in different treatments were the highest in 8 years of reclaimed soil with MCFB treatment. On the whole, after 8 consecutive years of reclamation, the biomineralization parameters of chemical fertilizer combined with biological organic fertilizer were improved to a greater extent than those of other fertilization measures. However, with the increase of reclamation years, the increase of N_0 , N_0/N treated with chemical fertilizer and organic fertilizer was the largest, the reduction rate of N_t/N was the lowest in the treatment of chemical fertilizer combined with biological organic fertilizer, and the potential mineralizable organic nitrogen content decreased by (N_0/N) in long term single application of chemical fertilizer.

Keywords: mineral nitrogen; soluble organic nitrogen; nitrogen accumulation; mineralization rate; mineralization potential

土壤氮素的 92%~98% 为有机氮,除部分小分子有机态氮,绝大部分有机氮必须通过矿化作用转化为无机态氮才可以被植物所吸收利用^[1]。土壤氮素含量及其矿化难易程度与土壤供氮特性有密切关系,土壤有机氮矿化速率大多与土壤全氮含量呈显著或极显著正相关关系^[2]。山西省作为我国重要的煤炭开采地区,截止 2015 年,全省因采煤造成的采空区面积近 50 万 hm^2 ,其中沉陷区面积达 60% 以上,导致原有土壤的结构和层次遭到破坏,土壤理化性质改变,有机质含量降低,加之复垦过程中,机械化剥离和压占严重破坏了微生物生存和繁衍条件,导致微生物多样性锐减,耕地质量下降。研究采煤塌陷区复垦土壤活性氮及氮素矿化特征对明确复垦土壤有机氮库重建中氮素供应与积累动态规律具有重要意义。国内外学者对土壤氮素矿化进行了大量研究,对合理施肥和提高肥料氮素利用率起到了重要作用。有研究^[3-5]通过长期定位试验,表明有机无机配施较单施化肥明显提高了 0—60 cm 土层可矿化氮量和矿化率及土壤活性有机氮,进而提高土壤供氮能力;鲁彩艳等^[6]通过 Stanford 矿化率法研究发现,长期不同施肥制度培育土壤氮矿化势和供氮潜能明显不同。长期单施化肥或有机肥使土壤供氮能力分别比不施肥对照提高 42.27% 和 49.53%,有机无机相结合使土壤供氮能力提高 81.76%;郝晓晖等^[7]研究表明,无机化肥配施有机肥显著增加了稻田土壤各种形态氮的含量,无机化肥结合秸秆还田主要提高了氨基酸氮

和氨态氮的含量,而单施无机肥对酸解氮各组分含量影响不大;Zhang 等^[8]经过封丘 17 年定位试验研究表明,长期化学氮肥的施用能提高稳定性有机氮库的矿化速率,而有机肥刺激了不稳定性有机氮库的矿化速率;Wang 等^[9]研究发现,有机肥的施入增强了异养微生物和氨氧化菌对铵态氮的竞争能力,从而降低硝态氮在土壤中的累积。但也有研究^[10]表明,氮磷配施可以提高土壤的矿质氮,但单施氮肥土壤氮矿化率较低。目前有关土壤有机氮矿化及活性有机氮方面的研究多集中在一般农田土壤,而山西采煤塌陷区采用表土剥离或混推复垦的土壤氮库容量较正常土壤偏低,氮素供应能力较差。因此,对复垦土壤氮素供应水平及有机氮矿化能力更具有深入研究的必要性。本试验基于山西省襄垣县洛江沟采煤塌陷区长期定位,研究不同培肥措施对复垦土壤活性氮含量和矿化量、矿化率以及矿化势变化特征的影响,以期矿区复垦土壤快速高效培肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长期定位试验基地位于山西省襄垣县洛江沟煤矿复垦区。该基地于 2008 年开始复垦,采用表土剥离模式(将 30 cm 表层土壤剥离后,挖高垫低,在底土平整后,将剥离的表土均匀覆盖于平整的底土上)。根据当地气候条件和农民种植习惯,复垦过程中每年种植玉米,玉米秸秆收获时粉碎直接翻压还田,每年秸秆还田量约 6 000 kg/hm^2 ,试验田玉米秸秆含 C

43%, N 0.75%, P_2O_5 0.12%, K_2O 1.36%。因此每年秸秆还田带入 C 2 580 kg/hm², N 45 kg/hm², P_2O_5 7.2 kg/hm², K_2O 81.6 kg/hm²。2009 年开始通过不同培肥措施和种植玉米来培肥土壤, 目前有复

垦 4 年和复垦 8 年土壤, 复垦 4 年土壤是于 2013 年开始复垦。试验区年降水量约 550 mm, 日平均气温 8~9 °C 以上, 有效积温达 3 000~4 000 °C。供试土壤类型为石灰性褐土。土壤理化性状见表 1。

表 1 不同复垦年限耕层土壤基本理化性状

复垦年限	处理	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	C/N	pH
4	对照(CK)	15.93	5.43	154.58	0.45	7.87	10.14	8.21
	化肥(CF)	20.06	10.24	178.96	0.55	11.02	11.62	8.12
	有机肥(M)	24.78	19.75	193.87	0.72	14.95	12.04	8.11
	有机肥+化肥(MCF)	23.01	13.78	158.64	0.65	12.90	11.51	8.12
	化肥+生物有机肥(MCFB)	24.19	18.04	147.80	0.63	13.76	12.67	8.14
8	对照(CK)	24.19	6.71	143.74	0.57	9.84	10.01	8.14
	化肥(CF)	27.73	25.17	184.38	0.72	13.21	10.64	7.98
	有机肥(M)	28.32	33.95	193.87	0.79	16.90	12.41	8.06
	有机肥+化肥(MCF)	27.14	15.48	176.26	0.77	14.12	10.64	8.06
	化肥+生物有机肥(MCFB)	34.81	25.30	173.55	0.74	14.81	11.61	8.01
周边农田熟土(UF)		33.63	11.34	223.67	1.12	31.72	16.43	8.11

1.2 试验设计

试验采用双因素随机区组设计。自 2009 年起, 共设 5 个培肥处理, 处理 1: 对照(CK); 处理 2: 单施化肥(CF); 处理 3: 单施有机肥(M); 处理 4: 有机肥+化肥(MCF, $w=50\%$ 的有机肥氮和 $w=50\%$ 的化肥氮); 处理 5: 化肥+生物有机肥(MCFB), 每个处理重复 3 次, 小区面积为 100 m² (10 m×10 m)。试验有机肥为完全腐熟的鸡粪, 其有机质、N、 P_2O_5 和 K_2O 质量分数分别为 27.2%, 1.68%, 1.54% 和 0.82%。化肥分别使用尿素(N 质量分数为 46.4%)、过磷酸钙(P_2O_5 质量分数为 16%) 和氯化钾(K_2O 质量分数为 60%)。菌肥所用菌种为 1 株拉恩菌(Rahnella) 和 2 株荧光假单胞菌(Fluorescent pseudomonas), 彼此之间不存在拮抗作用, 高密度发酵后, 按 V(菌液): m(腐熟的鸡粪)=1:9 的比例将两者在搅拌机中混匀, 制成解磷菌肥, 有效活菌数(以 CFU 计) $\geq 0.5 \times 10^8$ CFU/g。试验有机肥用量为 12 000 kg/hm², 然后计算其 N、P、K 养分含量, 再确定其他肥料用量, 具体施肥量见表 2。所有肥料均在玉米种植前一次性施入, 所有处理玉米秸秆每年均通过联合收割机粉碎还田。本试验依托该试验基地, 研究不同培肥措施下复垦 4 年和 8 年土壤中活性氮及氮素矿化变化特征。

表 2 不同处理的施肥用量

处理	单位: kg/hm ²				
	N	P_2O_5	K_2O	有机肥	菌肥
对照(CK)	0	0	0	0	0
化肥(CF)	201.5	184.8	98.5	0	0
有机肥(M)	0	0	0	12000	0
有机肥+化肥(MCF)	100.8	92.4	49.3	6000	0
化肥+生物有机肥(MCFB)	100.8	92.4	49.3	5250	750

1.3 样品采集

于 2017 年 4 月玉米播种前在试验基地采集 5 种

培肥措施下复垦 4 年和 8 年的耕层(0—20 cm) 土样, 同时采集未塌陷复垦的多年种植熟土作为对照来评价培肥效果。样品自然风干后, 过 2 mm 筛用于好气培养间歇淋溶试验, 测定土壤中活性氮及矿化势。

1.4 测定项目与方法

好气培养间歇淋洗试验: 称取过 2 mm 筛的风干土 25 g, 同等量石英砂混匀后铺入 100 mL 的注射器中(注射器的顶部和底部铺好玻璃丝和石英砂, 起到缓冲作用)。然后用 100 mL 0.01 mol/L Ca_2Cl_2 溶液少量多次淋洗土壤起始可溶性总氮, 收集淋洗液用于测定土壤起始所含可溶性有机氮和矿质氮含量。淋洗完毕后加入 40 mL 无氮营养液(0.5 mmol/L $CaHPO_4 \cdot 2H_2O$ 、2 mmol/L $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 、2 mmol/L $CaSO_4$ 和 2.5 mmol/L K_2SO_4 混合液), 之后抽除多余水分, 注射器宽口密封后再扎 1 小孔, 保持管内通气良好, 然后在放入(35±1) °C 的恒温箱下培养, 在培养 1, 2, 3, 5 周后, 分别再用 100 mL 0.01 mol/L $CaCl_2$ 溶液淋洗培养期间所产生矿质氮和可溶性有机氮(SON)。

淋洗液总氮采用过硫酸钾氧化法测定^[11]; 淋洗液矿质态氮(硝态氮和铵态氮)采用流动分析仪测定; 淋洗液可溶性有机氮为淋洗液总氮与矿质态氮(硝态氮和铵态氮)之差即为可溶性有机氮含量。

1.5 计算方法

本试验采用 Stanford 等^[12] 的 5 周矿化率培养法, 研究不同施肥制度培育土壤的氮矿化势。根据 Stanford 求解公式:

$$N_0 = N_t / (1 - 10^{-kt/2.303}) \quad (1)$$

式中: N_0 为氮矿化势(mg/kg); t 为培养时间(周), 本试验 t 值为 5 周; N_t 为 t 时间(周)内累积的矿质氮量(mg/kg); k 为矿化速率常数。根据修正的埃伦纽斯

方程式:

$$\lg k = 7.71 - 2758/T \quad (2)$$

求得 35 °C 的矿化速率常数 k 值为 0.057 5。

累积氮素 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 产生量 (mg/kg) = 淋洗液氮素累积量 (mg) / 土壤样品质量 (kg)

(3)

土壤氮素矿化率 (mg/g) = 土壤氮素矿化量 / 土壤全氮含量 $\times 100\%$

(4)

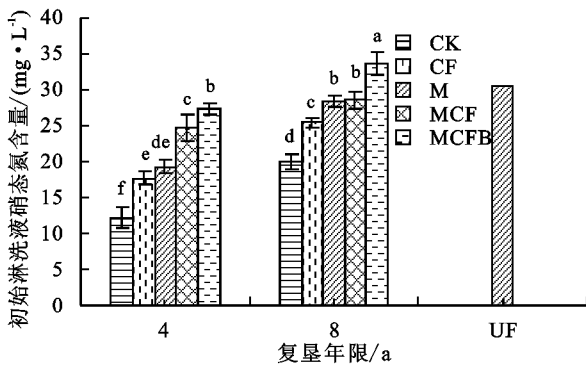
1.6 数据统计与分析

利用 SPSS 软件,对数据进行方差分析,采用双因素方差分析 ($P < 0.05$),LSD 法进行多重比较;并结合 Excel 软件分析作图。

2 结果与分析

2.1 复垦土壤氮素矿化过程中硝态氮变化特征

从图 1 可以看出,随复垦年限增加土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量总体呈增加趋势,表现为复垦 8 年土壤各培肥



注:不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著性。下同。

图 1 复垦土壤好气培养间歇淋洗过程中硝态氮产生量

2.2 复垦土壤氮素矿化过程中铵态氮变化特征

由图 2 可知,不同培肥处理复垦土壤中淋洗液 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量随复垦年限增加呈增加趋势,复垦 8 年土壤各培肥处理初始淋洗液 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度较 4 年土壤增加了 6.25%~60.61%。不同处理中复垦 8 年土壤的 MCFB 含量最高,显著高于复垦 8 年的 MCF 和复垦 4 年的 MCF 处理,但较周边未塌陷破坏农田土壤仍低 30%。而复垦 4、8 年的 M、CF 和 CK 处理之间总体无显著差异。

经过 5 周培养,不同培肥措施下复垦 8 年土壤铵

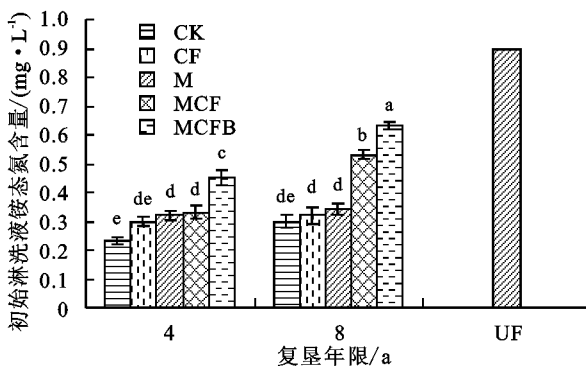
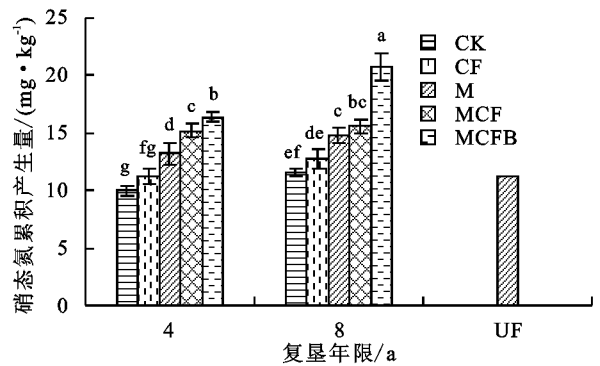


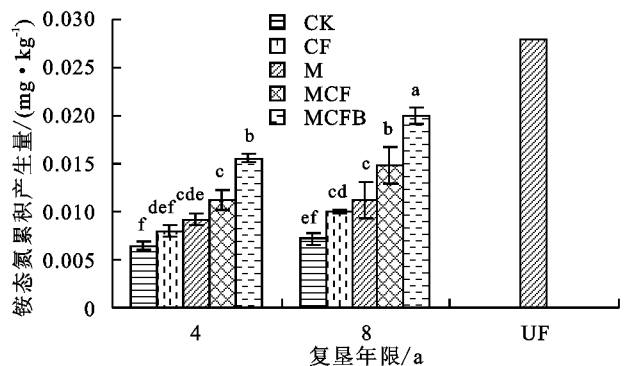
图 2 复垦土壤好气培养间歇淋洗过程中铵态氮产生量

处理初始淋洗液 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度较复垦 4 年土壤增加了 15.79%~63.93%。不同处理之间以复垦 8 年的 MCFB 处理最高,达 33.7 mg/L ,且显著高于 8 年 CF 和 4 年 CF、M 和 MCFB 处理,同时较周边未塌陷破坏农田土壤增加了 10.13%。

经过 5 周培养,复垦 4 年和复垦 8 年土壤各处理硝态氮累积产生量分别为 10.0~16.4 mg/kg 和 11.6~20.8 mg/kg 。复垦 8 年土壤硝态氮累积产生量总体显著高于复垦 4 年土壤。同一复垦年限下,不同培肥措施土壤硝态氮产生量均表现为 $\text{MCFB} > \text{MCF} > \text{M} > \text{CF} > \text{CK}$ 。在复垦年限和培肥措施双重影响下,以复垦 8 年土壤的 MCFB 处理最高,较周边未塌陷农田熟土高 86%,且显著高于其他处理。同时由图 1 可知,复垦 4 年土壤的 MCFB 处理的硝态氮累积产生量与复垦 8 年土壤的 MCF 处理差异不显著,均值为 16.0 mg/kg ,并显著高于复垦 8 年的 M、CF 和 CK 处理。



态氮累积产生量整体高于复垦 4 年土壤,其中 MCFB 和 MCF 处理呈显著增加趋势,而 M、CF 和 CK 处理均无显著性增加。相同复垦年限下,不同培肥措施土壤铵态氮累积产生量均表现为 $\text{MCFB} > \text{MCF} > \text{M} > \text{CF} > \text{CK}$,且 MCFB 处理显著高于其他处理。在复垦年限和培肥措施双重影响下,以复垦 8 年土壤的 MCFB 铵态氮累积产生量最高,但较周边未塌陷破坏农田土壤低 29%。另外复垦 4 年的 MCFB 和复垦 8 年土壤的 MCF 处理之间无显著差异。



2.3 复垦土壤氮素矿化过程可溶性有机氮变化特征

由图3可知,各培肥处理下复垦8年的初始淋洗液SON含量和复垦4年土壤无显著性差异。复垦4,8年土壤各处理初始淋洗液SON含量均低于周边未塌陷破坏农田,原因可能是复垦土壤本身的氮库容量低,周边未塌陷破坏农田的有机质和全氮含量较高。

经过5周淋洗培养,复垦4年和复垦8年土壤各处理SON累积产生量分别为15.5~49.4mg/kg和

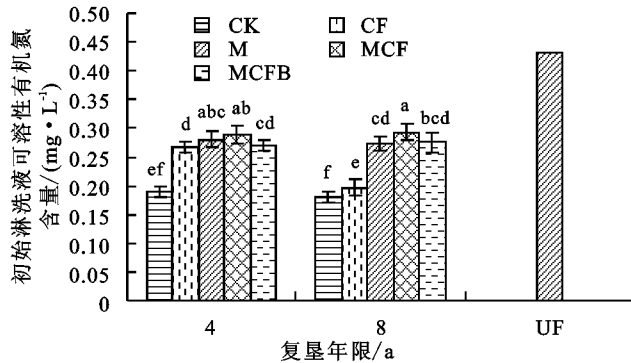


图3 复垦土壤好气培养间歇淋洗过程中可溶性有机氮产生量

2.4 培肥措施对复垦土壤有机氮矿化参数的影响

由表3可知,不同施肥处理较不施肥对照提高复垦土壤氮素矿化量(N_t),且随复垦年限增加而增加。复垦4,8年土壤 N_t 均以MCFB处理最高,较CK分别高68.80%和85.06%。根据一级动力学方程拟合的不同处理土壤氮素矿化势(N_0)的变化范围,复垦4,8年土壤分别为42.59~71.89,49.31~91.26 mg/kg。相同复垦年限下,不同处理 N_0 总体表现为MCFB>MCF>M>CF>CK; N_0 占土壤全氮含量的

16.1~51.1 mg/kg。相同复垦年限下,不同处理间SON累积产生量表现为MCFB>MCF>M>CF>CK,且不同处理间差异达显著水平。在复垦年限和培肥措施双重影响下,复垦4年土壤的MCFB处理SON累积产生量与复垦8年土壤的MCFB处理差异不显著。复垦8年土壤M和CF处理的SON累积产生量反而低于复垦4年土壤。不同处理间总体以复垦8年土壤的MCFB的SON累积产生量最高,较周边未塌陷破坏农田土壤高66%。

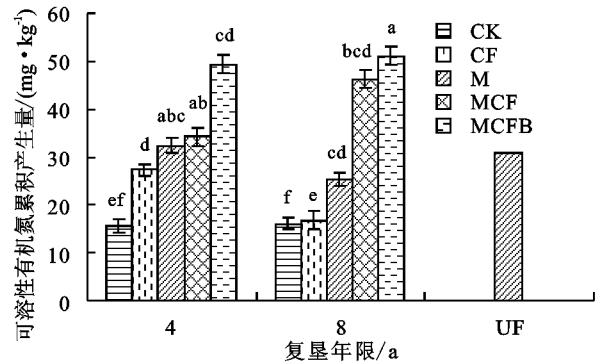


图3 复垦土壤好气培养间歇淋洗过程中可溶性有机氮产生量

2.4 培肥措施对复垦土壤有机氮矿化参数的影响

由表3可知,不同施肥处理较不施肥对照提高复垦土壤氮素矿化量(N_t),且随复垦年限增加而增加。复垦4,8年土壤 N_t 均以MCFB处理最高,较CK分别高68.80%和85.06%。根据一级动力学方程拟合的不同处理土壤氮素矿化势(N_0)的变化范围,复垦4,8年土壤分别为42.59~71.89,49.31~91.26 mg/kg。相同复垦年限下,不同处理 N_0 总体表现为MCFB>MCF>M>CF>CK; N_0 占土壤全氮含量的

比例(N_0/N)反映土壤中易矿化有机氮的情况,其值越大则表示土壤全氮中可矿化有机氮的数量越多。复垦4年土壤 N_0/N 为78.50~114.11 mg/g,复垦8年土壤 N_0/N 在76.72~123.32 mg/g,其中仍以MCFB处理最高。从矿化率(N_t/N)来看,不同处理间以复垦8年土壤的MCFB处理最高,较周边未塌陷农田土壤高2.5倍。原因可能是MCFB处理可以为微生物代谢提供合适的碳氮比(9:1),同时生物菌剂的加入提高微生物多样性及活性,进而促进了氮素的矿化。

表3 不同培肥处理对复垦土壤有机氮矿化参数的影响

处理	4年复垦土壤					8年复垦土壤				
	全氮/ (g·kg ⁻¹)	有机氮矿化参数				全氮/ (g·kg ⁻¹)	有机氮矿化参数			
		N_t / (mg·kg ⁻¹)	N_0 / (mg·kg ⁻¹)	N_0/N / (mg·g ⁻¹)	N_t/N / (mg·g ⁻¹)		N_t / (mg·kg ⁻¹)	N_0 / (mg·kg ⁻¹)	N_0/N / (mg·g ⁻¹)	N_t/N / (mg·g ⁻¹)
CK	0.45	10.64	42.59	94.64	23.64	0.57	12.32	49.31	86.51	21.61
CF	0.55	12.00	48.03	87.33	21.82	0.72	13.80	55.24	76.72	19.17
M	0.72	14.12	56.52	78.50	19.61	0.79	15.92	63.72	80.66	20.15
MCF	0.65	16.32	65.32	100.50	25.11	0.77	17.08	68.37	88.79	22.18
MCFB	0.63	17.96	71.89	114.11	28.51	0.74	22.80	91.26	123.32	30.81
UF	1.12	14.00	56.04	50.04	12.50	1.12	14.00	56.04	50.04	12.50

3 讨论

本研究表明,不同培肥处理一定程度上均可以提高复垦土壤的矿质态氮含量,同一复垦年限下,不同培肥措施土壤初始淋洗液 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量均表现为MCFB>MCF>M>CF>CK,复垦8年土壤总体高于复垦4年土壤,表明长期化肥配施有机肥或生物有机肥可促进土壤中矿质态氮库的积累。陶瑞等^[13]和张国娟等^[14]在其他农田系统的研究也有类似的研究结果。同时本研究表明,化肥配施生物有机肥更有利于复垦土

壤有机氮向矿质态氮的转化,表现为经过5周培养,复垦8年土壤的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 累积产生量显著高于其他处理。原因可能是无机和有机肥的配施进一步协调了微生物生命活动所需的C/N,提高了微生物活性,同时生物菌剂的加入更大程度上提高了微生物多样性,促进有机物质的分解转化。

可溶性有机氮(SON)在土壤氮素循环平衡中起着重要的作用,可通过矿化作用转化为矿质态氮,也可被植物直接吸收利用^[15-16]。本研究表明,与长期

施用化肥相比,长期化肥配施有机肥可提高土壤可溶性有机氮含量,其他学者也得出类似结论^[17-18]。可溶性有机氮增加的原因一方面可能来源于施入的有机肥^[19],另一方面也可能是有机无机配施促进了还田玉米秸秆的分解转化。而在短期培养过程中,相同复垦年限下,化肥配施生物有机肥较其他处理可显著提高土壤 SON 的累积产生量,并明显高于周边未塌陷破坏农田土壤。这可能是由于长期使用生物有机肥的菌剂效应,提高了对应处理土壤的微生物多样性,提高了微生物对土壤大分子有机物质的分解作用。

在本研究中,经过 5 周密闭培养,土壤累积矿化氮量变化在 10.64~22.8 mg/kg(表 3),远低于赵伟等^[4]在黄土旱塬长达 20 多年的定位施肥研究结果(N_t :178~352 mg/kg)。这与土壤肥力特征及培养时间有关。本试验中,化肥配施有机肥或化肥配施生物有机肥较其他处理明显提高了 4,8 年复垦土壤氮素矿化量,且复垦 8 年土壤高于复垦 4 年土壤。说明有机肥及生物菌剂的施入能够明显增强土壤氮素的矿化作用,提高土壤活性有机氮含量。这与国内一些研究^[20-22]得出的结论类似。土壤氮素矿化势表示有机氮矿化的最大潜力,本研究中复垦 4 年土壤氮矿化势为 42.59~71.89 mg/kg,8 年氮矿化势为 49.31~91.26 mg/kg,其中以化肥配施生物有机肥处理最高,表明有机无机配施能明显提高土壤氮素矿化势。一些研究^[5]也表明,长期有机肥与无机肥配施可提高表层土壤氮素矿化势,增加了土壤活性有机氮库量。

本试验还表明,单施化肥和单施有机肥处理矿化势/全氮均低于化肥配施有机肥、化肥配施生物有机肥,即有机无机配施能明显提高土壤可矿化的有机氮含量,增强土壤氮素矿化势和土壤氮的作物供应能力,此结果与鲁彩艳等^[6]的研究结论基本一致。而巨晓棠等^[23]在长期冬小麦—夏玉米—春玉米旱作土壤的研究表明,35℃培养条件下, N_0 占全氮的比例为 7.23%~17.36%,无论施入氮肥还是氮肥与有机肥配合均会提高 N_0 占全氮的百分数,但在高氮水平下(270 kg/hm²)下,单施化肥的 N_0/N 要高于化肥配施有机肥,原因可能是高氮水平降低了土壤 C/N,更有利于微生物对土壤有机物质的矿化分解。

4 结论

本研究中,矿区复垦土壤有机氮矿化过程中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 SON 累积产生量随复垦年限增加而增加,同一复垦年限下,化肥配施生物有机肥可更大程度上促进土壤稳定性有机氮向可溶性有

机氮及矿质态氮的转化。无论施肥与否及施肥种类,复垦土壤矿化势(N_0)均随复垦年限增加而增加。不施肥或单施化肥处理的潜在可矿化氮(N_0/N)随复垦年限增加而减小,其他处理反之。化肥配施有机肥处理的矿化率(N_t/N)随复垦年限增加而增加,其他处理反之。总体表明,化肥配施生物有机肥更大程度上提高了复垦土壤各项矿化参数值(N_0 、 N_0/N 和 N_t/N),但随复垦年限增加,以化肥配施有机肥处理的 N_0 、 N_0/N 的增加幅度最大,以化肥配施生物有机肥处理的 N_t/N 减少率最低,长期单施化肥有降低潜在可矿化有机氮量(N_0/N)的趋势。

参考文献:

- [1] 王艳杰,邹国元,付桦,等. 土壤氮素矿化研究进展[J]. 中国农学通报,2005,21(10):203-208.
- [2] 王敬. 土壤氮转化过程对氮去向的调控作用[D]. 南京: 南京师范大学,2017.
- [3] 艾娜,周建斌,杨学云,等. 长期施肥及撂荒对土壤氮素矿化特性及外源硝态氮转化的影响[J]. 应用生态学报,2008,19(9):1937-1943.
- [4] 赵伟,梁斌,周建斌. 长期不同施肥处理对土壤氮素矿化特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2017,45(2):177-181.
- [5] 王慧,刘金山,惠晓丽,等. 旱地土壤有机碳氮和供氮能力对长期不同氮肥用量的响应[J]. 中国农业科学,2016,49(15):2988-2998.
- [6] 鲁彩艳,牛明芬,陈欣,等. 不同施肥制度培育土壤氮矿化势与供氮潜力[J]. 辽宁工程技术大学学报,2007(5):773-775.
- [7] 郝晓晖,肖宏宇,苏以荣,等. 长期不同施肥稻田土壤的氮素形态及矿化作用特征[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2007(5):544-550.
- [8] Zhang J B, Zhu T B, Cai Z C, et al. Effects of long-term repeated mineral and organic fertilizer applications on soil nitrogen transformations[J]. European Journal of Soil Science, 2012, 63(1):75-85.
- [9] Wang J, Zhu B, Zhang J B, et al. Mechanisms of soil N dynamics following long-term application of organic fertilizers to subtropical rain-fed purple soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 91:222-231.
- [10] 王淑英,樊廷录,丁宁平,等. 长期施肥下黄土旱塬黑垆土供氮能力的变化[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(6):1487-1495.
- [11] 章萍. 水中总氮测定相关问题的实验探讨[J]. 能源环境保护,2011,25(3):26-29.
- [12] Stanford G, Smith S J. Nitrogen mineralization potentials of soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1972, 36(3):465-472.

1 处理(SRU2)小麦产量、氮肥利用率、生态效益高于其他处理,可作为安徽小麦种植区域适宜的缓释尿素和普通尿素掺混比例。

参考文献:

- [1] 范仲卿,赵广才,田奇卓,等. 拔节期至开花期控水对冬小麦氮素吸收运转的影响[J]. 核农学报,2014,28(8):1478-1483.
- [2] 范雪梅,戴廷波,姜东,等. 花后干旱与渍水下氮素供应对小麦碳氮运转的影响[J]. 水土保持学报,2004,18(6):63-67.
- [3] 丁锦峰,陈芳芳,王云翠,等. 后期追氮时期对扬麦 20 花后光合物质生产力和产量的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版),2012,33(3):56-62.
- [4] 白由路. 我国肥料产业面临的挑战与发展机遇[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(1):1-8.
- [5] Yang Y C, Zhang M, Zheng L, et al. Controlled release urea improved nitrogen use efficiency, yield, quality of wheat[J]. *Agronomy Journal*,2011,103(2):479-485.
- [6] Zheng W K, Zhang M, Liu Z G, et al. Combining controlled-release urea and normal urea to improve the nitrogen use efficiency and yield under wheat-maize double cropping system[J]. *Field Crops Research*,2016,197:52-62.
- [7] 袁媛媛,邹刚,孙义祥. 淮北地区缓释尿素对小麦生长、氮肥利用及土壤硝态氮的影响[J]. 中国土壤与肥料,2015,52(3):29-33,78.
- [8] Trinh T H, Kishaari K, Shuib A S, et al. Modeling the release of nitrogen from controlled release fertilizer: Constant and decay release[J]. *Biosystems Engineering*,2015,130:34-42.
- [9] 程冬冬,窦午红,赵贵哲,等. 高分子缓/控释肥氮磷养分释放特征及影响因素研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2015,23(3):484-492.
- [10] Masoni A, Ercoli L, Mariotti M, et al. Post-anthesis accumulation and remobilization of dry matter, nitrogen and phosphorus in durum wheat as affected by soil type[J]. *European Journal of Agronomy*,2007,26(3):179-186.
- [11] 金之庆,石春林,葛道阔,等. 长江下游平原小麦生长气候变化特点及小麦发展方向[J]. 江苏农业学报,2001,17(4):193-199.
- [12] 何照范. 籽粒粮油品质及其分析技术[M]. 北京:中国农业出版社,1985.
- [13] Novoa R, Loomis R S. Nitrogen and plant production[J]. *Plant Soil*,1981,58:177-204.
- [14] 赵满兴,周建斌,杨绒,等. 不同施氮量对旱地不同品种冬小麦氮素累积、运输和分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(2):143-149.
- [15] 石玉,于振文. 施肥量及低追比例对小麦产量、土壤硝态氮含量和氮平衡的影响[J]. 生态学报,2006,26(11):3362-3369.
- [16] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境,2000,9(1):1-6.
- [17] Geng J B, Sun Y B, Zhang M, et al. Long-term effects of controlled release urea application on crop yields and soil fertility[J]. *Field Crops Research*,2015,184:65-73.
- [18] 吴晓静,江海东,周琴. 花后酸雨和渍水胁迫对小麦氮代谢关键酶活性及籽粒蛋白质组成的影响[J]. 南京农业大学学报,2016,39(1):26-33.
- [19] 杨宪龙,路永莉,同延安,等. 施氮和秸秆还田对小麦一玉米轮作农田硝态氮淋溶的影响[J]. 土壤学报,2013,50(3):564-573.
- [18] 梁斌,李俊良,杨学云,等. 施肥对麦田土壤可溶性有机氮的影响[J]. 生态学报,2016,36(14):4430-4437.
- [19] 赵满兴,周建斌,陈竹君,等. 有机肥中可溶性有机碳、氮含量及其特性[J]. 生态学报,2007,27(1):297-403.
- [20] Liang B, Yang X Y, Murphy D V, et al. Fate of ¹⁵N-labeled fertilizer in soils under dryland agriculture after 19 years of different fertilizations[J]. *Biology and Fertility of Soils*,2013,49(8):977-986.
- [21] 彭银燕,黄运湘,孙梅. 长期施肥条件下水稻土有机氮组分及矿化特性研究[J]. 水土保持学报,2012,26(5):173-176.
- [22] 王媛,周建斌,杨学云. 长期不同培肥处理对土壤有机氮组分及氮素矿化特性的影响[J]. 中国农业科学,2010,43(6):1173-1180.
- [23] 巨晓棠,边秀举,刘学军,等. 旱地土壤氮素矿化参数与氮素形态的关系[J]. 植物营养与肥料学报,2000,6(3):251-259.

(上接第 232 页)

- [13] 陶瑞,唐诚,李锐,等. 有机肥部分替代化肥对滴灌棉田氮素转化及不同形态氮含量的影响[J]. 中国土壤与肥料,2015(1):50-56.
- [14] 张国娟,濮晓珍,张鹏鹏,等. 干旱区棉花秸秆还田和施肥对土壤氮素有效性及根系生物量的影响[J]. 中国农业科学,2017,50(13):2624-2634.
- [15] 张亚亚,李军,郭颖,等. 土壤可溶性有机氮的研究进展[J]. 生态学杂志,2016,35(6):1661-1669.
- [16] Neff J C, Chapin F S III, Vitousek P M. Breaks in the cycle: Dissolved organic nitrogen in terrestrial ecosystems[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*,2003,1(4):205-211.
- [17] Ros G H, Hoffland E, van Kessel C, et al. Extractable and dissolved soil organic nitrogen: A quantitative assessment[J]. *Soil Biology and Biochemistry*,2009,41(6):1029-1039.